

**О.Н.СИЗОНЕНКО**, докт.техн.наук; **Э.И.ТАФТАЙ**, **Р.И.МАЛАЯ**,  
**Р.П.КОЛМОГорова**; **Е.В.ЛИПЯН**; **А.С.ТОРПАКОВ**; Институт  
импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ИНДУКТИВНОСТИ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ В РАСТВОРАХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА**

Наведено результати експериментальних досліджень впливу індуктивності розрядного контуру при високовольтних електричних розрядах в розчинах поверхнево-активних речовин на їх поверхневу активність – поверхневе натягнення, кут змочування, роботу адгезії і миючу дію.

In report the results of experimental researches of influence of inductivity of discharge circuit of high-voltage electric discharges in solutions of superficially-active matters on their superficial activity - surface-tension, edge corner of moistening, work of adhesion and washing action are represented.

**Постановка задачи.** Комбинированные физико-химические методы воздействия с целью изменения свойств различных дисперсных систем являются наиболее эффективными, о чем свидетельствует анализ отечественных и зарубежных источников [1-3]. Основой таких методов является сочетание химических (предусматривается применение различных поверхностно-активных веществ (ПАВ)) и волновых (акустические, гидроакустические, вибросейсмические, электромагнитные, гидроимпульсные и электроразрядные) воздействий. При этом ПАВ способствуют улучшению агрегативной устойчивости и структурно-механических свойств суспензий, снижению твердости горных пород, облегчая тем самым их разрушение и обеспечивая возможность увеличения механической скорости проходки долот.

Работы [4-9] показывают, что физико-химическое воздействие высоковольтного электрического разряда (ЭР) и раствора ПАВ, сочетающее циклическое импульсное нагружение и адсорбционную способность ПАВ, позволяет управлять поверхностными явлениями в дисперсных системах.

Ранее в работе [10], рассматривалось влияние режимов ввода энергии высоковольтных импульсных разрядов в растворах ПАВ на их основные свойства. Режим ввода энергии в плазменный канал разряда варьировался изменением емкости разрядного контура и напряжения самопробоя разрядника, при этом в диапазоне варьируемых значений элементов разрядного контура неизменными были запасаемая энергия и индуктивность контура, а емкость разрядного контура и напряжение самопробоя разрядника изменялась ступенями. Результаты исследований, которые представлены в работе [10], показывают, что ЭР воздействие в диапазоне исследуемых режимов

ввода приводит к изменению поверхностной энергии мелкодисперсных систем на основе ПАВ. В этой работе не рассматривалось влияние индуктивности контура на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах.

**Целью** данной работы является установление связи между режимом ввода энергии путем изменения индуктивности разрядного контура при высоковольтных ЭР в мелкодисперсных системах на основе ПАВ и поверхностными явлениями и обменными процессами на межфазных границах многофазных сред.

**Методика эксперимента.** Для исследований использованы представители анионоактивных (Сульфенол концентрацией  $4 \text{ г/дм}^3$ ), катионоактивных (Катапин концентрацией  $6 \text{ г/дм}^3$ ), неионогенных (АФ<sub>9</sub>-12 концентрацией  $1 \text{ г/дм}^3$ ) типов ПАВ и смесь анионных и неионогенных ПАВ (многофункциональная композиция НМК-РХ концентрацией  $3 \text{ г/дм}^3$ ).

Экспериментальные исследования выполнялись на стенде, описанном в работе [10].

Исследуемый водный раствор ПАВ, мелкодисперсная система на основе ПАВ, с заданной концентрацией, в объеме  $1 \text{ дм}^3$ , заливался в нержавеющую разрядную камеру, которая закрывалась крышкой. Камера была оборудована электродной системой острие – плоскость. Межэлектродный промежуток подбирался с целью обеспечения разрядов, близких к критическим. Параметры ввода энергии в плазменный канал разряда варьировались путем изменения индуктивности разрядного контура. Запасаемая энергия была неизменной и равной  $1 \text{ кДж}$ , при этом емкость составляла  $2,4 \text{ мкФ}$ , напряжение самопробоя разрядника составляло  $30 \text{ кВ}$ , а индуктивность изменялась от  $8$  до  $32 \text{ мкГн}$  ( $L = 8, 2L = 16, 4L = 32 \text{ мкГн}$ ). Число разрядов для всех растворов ПАВ было неизменным и составляло  $n = 300$ , при этом забор проб из разрядной камеры осуществлялся воздействием  $50; 100; 200$  и  $300$  разрядов. В процессе воздействия производилась регистрация разрядных токов и напряжений на запоминающий осциллограф с последующей обработкой данных на компьютере. Варьирование значениями индуктивности разрядного контура позволяло изменять скорость нарастания тока от  $0,49$  до  $2,58 \cdot 10^9 \text{ А/с}$ , а длительность первой полуволны тока от  $9,2$  до  $37 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , тем самым, изменяя параметры ввода энергии в плазменный канал разряда.

Исследование влияния индуктивности разрядного контура при ЭР в растворах ПАВ на поверхностные явления и обменные процессы проводилось методом экспериментального измерения величины поверхностного натяжения, краевого угла смачивания, моющей способности и теоретической оценки коэффициента растекания.

Для измерения поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) на границе жидкость

(раствор ПАВ) – газ (воздух) был выбран метод счета капель с использованием сталагмометра [11]. При определении краевого угла смачивания ( $\theta$ ) использовали метод измерения линейных размеров капли, нанесенной на поверхность [12]. По экспериментально полученным значениям  $\sigma$  и  $\theta$  определялся коэффициент растекания  $S$  по Гаркинсу – разность между работой адгезии  $W_a$  и работой когезии  $W_k$  [11], который характеризует процесс смачивания

$$S = W_a - W_k = \sigma \cdot (\cos\theta - 1). \quad (1)$$

Моющую способность исследуемых веществ по отношению к асфальто-смоло-парафиновым отложениям нефти определяли по методике «холодного» цилиндра, разработанной во ВНИИнефть г. Москва и изложенной ранее в [7].

Подробно указанные методики были изложены в работе [10].

**Основные результаты.** Известно [4, 7], что электрическая энергия, выделяющаяся в разрядном промежутке, оказывает влияние на физико-химические свойства раствора ПАВ как на стадии формирования канала, так и на стадии выделения энергии в канале разряда. Экспериментально установлено, что в используемой электродной системе острие – плоскость при межэлектродном промежутке от 33 до 36 мм средний разброс отношения долей энергии, затраченной на каждую из стадий, лежит в пределах от 0,896 до 1,12. Удельное электрическое сопротивление исследуемых растворов ПАВ при этом отличалось существенно: от  $\rho = 5,98 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (Катапин),  $\rho = 10,19 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (АФ<sub>9</sub>-12),  $\rho = 10,48 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (Сульфонол) до  $\rho = 38,69 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (НМК-РХ), но не оказало существенного влияния на электрические характеристики активной стадии разряда. Хорошая стабильность отношений долей энергии дает возможность производить сравнение электроразрядного воздействия для данной группы растворов ПАВ при наработке одинакового числа разрядов.

По сравнению с результатами, изложенными в работе [10], где закон ввода изменялся путем варьирования емкости и напряжения самопробоя разрядника, варьирование индуктивностью, в исследуемом диапазоне, позволило реализовать больший динамический диапазон амплитуд и длительностей импульсов мощности (см. рис. 1-4).

На этих же рисунках приведены данные о влиянии удельной энергии воздействия на изменение свободной поверхностной энергии ПАВ – изменении поверхностного натяжения растворов ПАВ на границах с воздухом – при изменении параметров ввода энергии за счет изменения индуктивности контура.

Анализ результатов исследований показал, что ЭР воздействие на раствор Катапина (см. рис. 1, кривая 1) удельной энергией  $50 \text{ кДж/дм}^3$  при  $L = 8 \text{ мкГн}$  приводит к увеличению свободной поверхностной энергии системы, что проявляется в возрастании поверхностного натяжения раствора Катапина

на границе с воздухом на  $\sim 4\%$  (при погрешности измерения поверхностного натяжения не более  $1\%$ ). Дальнейшее увеличение удельной энергии до 100, 200 и 300 кДж/дм<sup>3</sup> практически не приводит к изменению поверхностного натяжения.

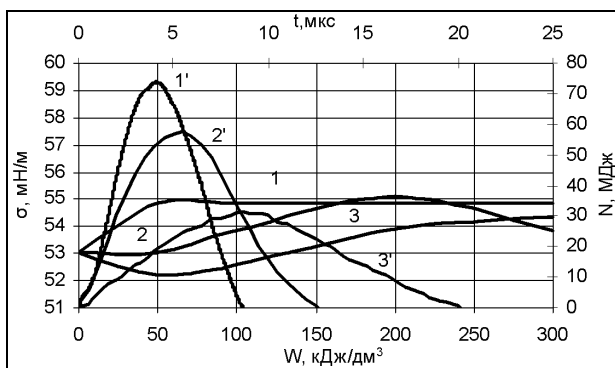


Рисунок 1 – Первый полупериод электрической мощности (1', 2', 3'), зависимость поверхностного натяжения Катапина от удельной энергии воздействия (1, 2, 3):  
1 –  $L = 8$  мкГн, 2 –  $L =$  мкГн, 3 –  $L =$  мкГн

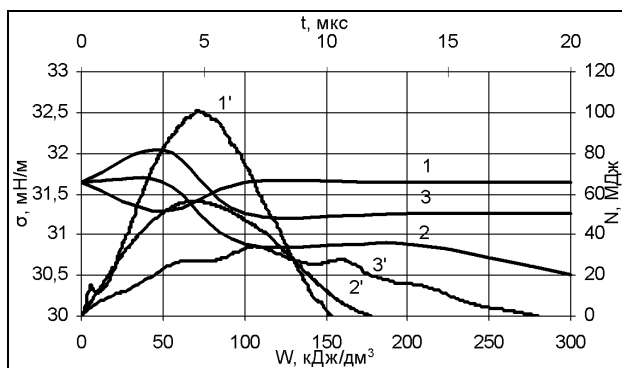


Рисунок 2 – Первый полупериод электрической мощности (1', 2', 3'), зависимость поверхностного натяжения АФ9-12 от удельной энергии воздействия (1, 2, 3):  
1 –  $L = 8$  мкГн, 2 –  $L = 16$  мкГн, 3 –  $L = 32$  мкГн

Изменение закона ввода энергии путем увеличения индуктивности разрядного контура до 16 мкГн приводит к существенному снижению скорости ввода энергии  $\sim$  в 2 раза, увеличению  $\sim$  в 1,41 раза длительности импульса, но некоторому снижению амплитуды импульса мощности  $\sim 10\%$ . При этом электроразрядное воздействие на раствор Катапина удельной энергией 50 кДж/дм<sup>3</sup> не оказывает влияния на свободную поверхностную энергию рас-

твора (рис. 1, кривая 2), система остается устойчивой. Количественные изменения наблюдаются лишь при возрастании удельной энергии воздействия до  $100 \text{ кДж/м}^3$  и приводят к увеличению поверхностного натяжения на  $\sim 2 \%$ , а значит и свободной поверхностной энергии системы, возрастание которой продолжается также при последующем импульсном нагружении до  $200 \text{ кДж/м}^3$  на  $4 \%$ . По мере приближения к величине  $300 \text{ кДж/м}^3$  наблюдается тенденция снижения поверхностного натяжения, которое достигает в итоге практически исходного значения.

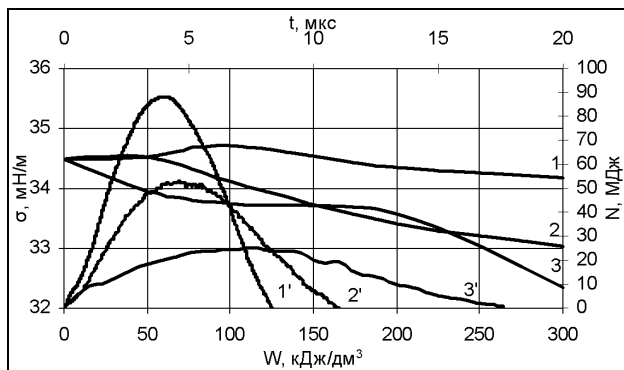


Рисунок 3 – Первый полупериод электрической мощности (1', 2', 3'), зависимость поверхностного натяжения Сульфолола от удельной энергии воздействия (1, 2, 3):  
1 –  $L = 8 \text{ мкГн}$ , 2 –  $L = 16 \text{ мкГн}$ , 3 –  $L = 32 \text{ мкГн}$

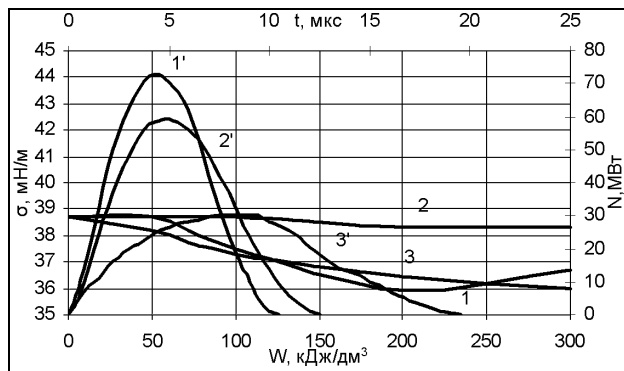


Рисунок 4 – Первый полупериод электрической мощности (1', 2', 3'), зависимость поверхностного натяжения НМК-РХ от удельной энергии воздействия (1, 2, 3):  
1 –  $L = 8 \text{ мкГн}$ , 2 –  $L = 16 \text{ мкГн}$ , 3 –  $L = 32 \text{ мкГн}$

Увеличение свободной поверхностной энергии системы целесообразно для целей торможения процессов смачивания и адсорбционных процессов.

Для задач интенсификации этих процессов необходимо снижение поверхностной энергии системы и, следовательно, ее поверхностного натяжения.

Дальнейшее увеличение индуктивности разрядного контура до 32 мкГн (рис. 1, кривая 3) вызвало снижение поверхностного натяжения на ~2 %, однако последующее увеличение введенной в систему энергии ведет к росту свободной поверхностной энергии системы и, как следствие этого наблюдается, увеличение поверхностного натяжения; в итоге поверхностное натяжение достигает величины на ~2 % большей, чем исходная.

ЭР воздействие на раствор АФ<sub>9</sub>-12 (рис. 2, кривая 1) энергией 50 кДж/м<sup>3</sup> при  $L = 8$  мкГн вызывает снижение поверхностного натяжения на ~2 %, однако дальнейшее повышение удельной энергии воздействия до 100 кДж/дм<sup>3</sup> приводит к росту свободной поверхностной энергии АФ<sub>9</sub>-12 и поверхностное натяжение системы на границе с воздухом повышается до исходного состояния.

Увеличение индуктивности разрядного контура до 16 мкГн приводит к устойчивому снижению поверхностного натяжения при увеличении энергии воздействия от 50 до 300 кДж/дм<sup>3</sup> (рис. 2 кривая 2), при этом конечная величина поверхностного натяжения меньше начальной на ~3 %. При увеличении индуктивности разрядного контура до 32 мкГн (рис. 2, кривая 3) воздействие 50 кДж/дм<sup>3</sup> приводит вначале к некоторому увеличению поверхностного натяжения, а при увеличении удельной энергии до 100 кДж/дм<sup>3</sup> начинается сдвиг равновесия в сторону снижения свободной внутренней энергии системы; поверхностное натяжение снижается на ~3 %. Данное явление сохраняется вплоть до удельной энергии обработки в 300 кДж/дм<sup>3</sup>

Поведение кривой поверхностного натяжения анионоактивного Сульфанола, представленное на рис. 3, свидетельствует о том, что воздействие удельной энергии 50 кДж/дм<sup>3</sup> при индуктивностях разрядного контура от 8 до 32 мкГн приводит к снижению поверхностного натяжения. Здесь наибольшее снижение свободной поверхностной энергии раствора (на ~6 %) наблюдается при 32 мкГн (рис. 3, кривая 3). Менее выраженное снижение поверхностного натяжения наблюдается при индуктивности 16 мкГн (рис. 3, кривая 2); а при индуктивности 8 мкГн наблюдаются лишь незначительные колебания свободной энергии системы и возврат значения поверхностного натяжения при 300 кДж/дм<sup>3</sup> к исходной величине (рис. 3, кривая 1).

Аналогично раствору Сульфанола ведет себя раствор НМК-РХ (рис. 4); наибольшее снижение свободной поверхностной энергии раствора наблюдается при 32 мкГн и составляет ~7 % (кривая 3). Однако при индуктивности 16 мкГн наблюдаются незначительные изменения поверхностного натяжения – зависимость практически линейна, (рис. 4, кривая 2). При снижении индуктивности до 8 мкГн наблюдается устойчивое уменьшение поверхностного натяжения при увеличении удельной энергии до 200 кДж/дм<sup>3</sup>, достигая величины, меньшей исходного на ~7 %, однако затем на промежутке от 200 до

300 кДж/дм<sup>3</sup> наблюдается тенденция к увеличению поверхностного натяжения при конечном поверхностном натяжении, меньшем исходного на ~4 % (рис. 4, кривая 1)

Следствием изменения поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ, согласно теории Ребиндера [13], является изменение их способности удалять отложения с твердых поверхностей - моющего действия. Свидетельством тому, что ЭР воздействие приводит к изменению поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ являются результаты исследований свободной поверхностной энергии ПАВ на границах с твердой поверхностью – коэффициента растекания и моющей способности. На рисунках 5 – 8 представленные результаты экспериментов по исследованию влияния удельной энергии ЭР воздействия и режима ввода энергии на изменение величины коэффициента растекания и моющей способности.

Установлено, что ЭР воздействие на раствор Катапина (см. рис. 5, кривая 1) удельной энергией 50 кДж/дм<sup>3</sup> и  $L = 8$  мкГн приводит к ухудшению способности удалять твердые отложения (моющее действие) на ~31 %. Увеличение индуктивности разрядного контура до 16 и 32 мкГн приводит к дальнейшему ухудшению моющего действия (см. рис. 5, кривые 2, 3).

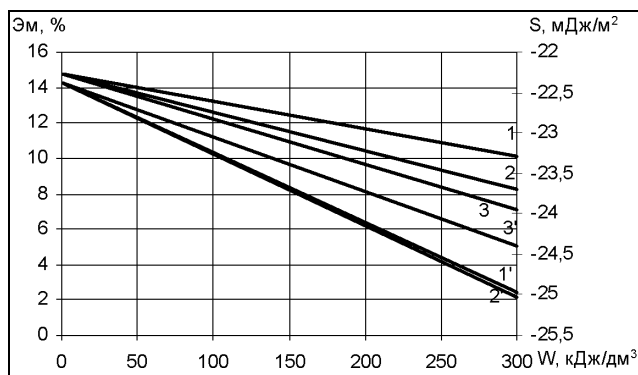


Рисунок 5 – Зависимость моющего действия (1, 2, 3) и коэффициента растекания (1', 2', 3'), Катапина от удельной энергии воздействия:  
1 –  $L = 8$  мкГн, 2 –  $L = 16$  мкГн, 3 –  $L = 32$  мкГн

Аналогичны изменения коэффициента растекания раствора Катапина после обработки, который снижается на ~11,5 % при  $L = 8$  мкГн и 16 мкГн, а при 32 мкГн – на 9 % (рис. 5, крив. 1', 2', 3').

Такие изменения моющего действия и коэффициента растекания Катапина при ЭР воздействии коррелируют с изменением поверхностного натяжения и свидетельствуют об увеличении свободной поверхностной энергии раствора. Причем, необходимо отметить, что увеличение поверхностной энергии системы Катапина коррелирует и с результатами работы [10].

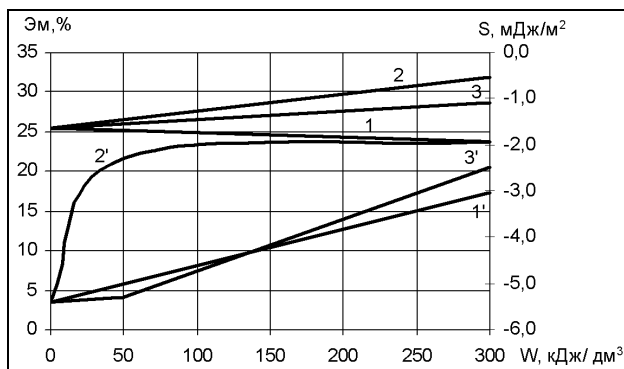


Рисунок 6 – Зависимость мощного действия(1, 2, 3) и коэффициента растекания (1', 2', 3'), АФ9-12 от удельной энергии воздействия  
1 –  $L = 8$  мкГн, 2 –  $L = 16$  мкГн, 3 –  $L = 32$  мкГн

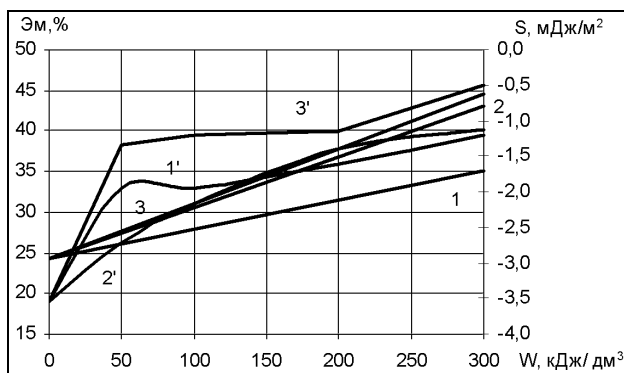


Рисунок 7 – Зависимость мощного действия(1, 2, 3) и коэффициента растекания (1', 2', 3'), Сульфанола от удельной энергии воздействия  
1 –  $L = 8$  мкГн, 2 –  $L = 16$  мкГн, 3 –  $L = 32$  мкГн

Иначе на ЭР воздействие реагирует раствор АФ<sub>9</sub>-12, его моющее действие при  $L = 8$  мкГн снижается на ~6 %, однако при индуктивности  $L = 16$  мкГн и 32 мкГн происходит улучшение моющей способности на ~26 % и ~12 % соответственно (см. рис. 6, кривые 1, 2, 3).

Коэффициент растекания АФ<sub>9</sub>-12 в зависимости от индуктивности разрядного контура изменяется аналогично моющему действию, его наибольшее улучшение наблюдается при  $L = 16$  мкГн и достигает ~64 %. Эти результаты коррелируют с изменением поверхностного натяжения и свидетельствуют о снижении свободной поверхностной энергии раствора в результате ЭР обработки. Такие изменения позволяют использовать раствор АФ<sub>9</sub>-12 в качестве рабочей среды ЭР для целей интенсификации процессов смачивания и адсорбционных процессов.



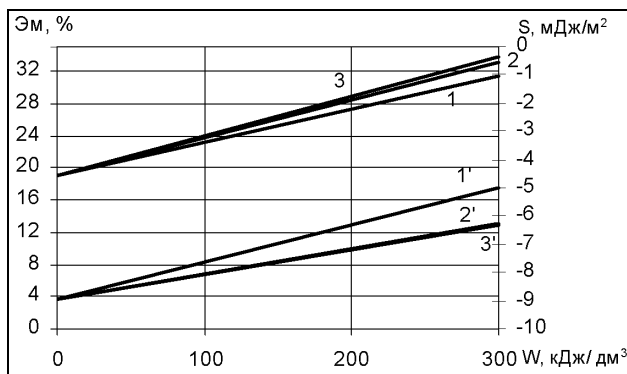


Рисунок 8 – Зависимость мощного действия (1, 2, 3) и коэффициента растекания (1', 2', 3'), НМК-РХ от удельной энергии воздействия  
 1 –  $L = 8$  мкГн, 2 –  $L = 16$  мкГн, 3 –  $L = 32$  мкГн

Аналогичным образом ЭР влияет и на раствор Сульфанола. Как видно из рис. 7, мощнее действие Сульфанола после ЭР обработки увеличивается на ~44 %, ~77 % и ~84 % соответственно при  $L = 8$  мкГн, 16 мкГн, 32 мкГн. Таким образом, увеличение индуктивности разрядного контура при ЭР обработке раствора Сульфанола (то есть увеличение длительности воздействия импульса) приводит к существенному уменьшению свободной энергии системы. Это подтверждается и результатами анализа изменения коэффициента растекания, который по мере увеличения индуктивности разрядного контура от  $L = 8$  мкГн до 32 мкГн увеличивается на ~66 %, ~68 % и ~85 % соответственно.

Подобная зависимость также характерна и для раствора НМК-РХ. Как видно из рис. 8, мощнее действие НМК-РХ вследствие ЭР-обработки при индуктивностях разрядного контура  $L = 8$  мкГн, 16 мкГн, 32 мкГн увеличивается на ~64 %, ~77 % и ~74 % соответственно. Несколько иным образом ведет себя коэффициент растекания, который при  $L = 8$  мкГн, 16 мкГн, 32 мкГн увеличивается на ~44 %, ~30 % и ~29 % соответственно.

Эти данные коррелируют с описанными выше данными по изменению поверхностного натяжения растворов. При снижении поверхностного натяжения снижается краевой угол смачивания и увеличивается коэффициент растекания. Это свидетельствует о том, что в результате ЭР система переходит в более активное состояние с меньшей энергией Гиббса. Жидкость, как известно, растекается, если ее межмолекулярные связи разрушаются, и вся система стремится к уменьшению поверхностной энергии [12].

**Выводы.** Установлено, что высоковольтные ЭР в мелкодисперсных системах на основе ПАВ влияют на поверхностные явления и обменные процессы на межфазных границах. Установлена связь между режимом ввода

энергии высоковольтных ЭР, обусловленная изменением индуктивности разрядного контура и изменением: поверхностного натяжения, краевого угла смачивания, коэффициента растекания и моющего действия растворов ПАВ. ЭР воздействие в диапазоне исследуемых режимов ввода энергии приводит к изменению поверхностной энергии исследуемых растворов ПАВ. Наиболее эффективно проявляется воздействие в растворах Сульфонола (анионного ПАВ), АФ<sub>9</sub> – 12 (неионогенного ПАВ) и НМК-РХ (смеси анионных и неионогенных ПАВ) при длительности импульса мощности более  $10 \cdot 10^{-6}$  с и удельной энергии воздействия в диапазоне от 50 до 100 кДж/дм<sup>3</sup>. Установлено, что изменение поверхностной энергии в мелкодисперсных системах на основе ПАВ путем ЭР воздействия с использованием индуктивности разрядного контура коррелирует с результатами работы [10]. Использование индуктивности в технологических процессах может быть более целесообразным, так как позволяет поддерживать интегральное значение энергии без изменения напряжения и емкости разрядного контура.

**Список литературы:** 1. Пат. 4506734 США, МКИ<sup>2</sup> E21 B43/26. Fracturing Huid Breaker system which is activated by fracture closure / K.G.Nolte. – Заявл. 5.6.84; Опубл. 11.10.85; Бюл. № 22. 2. Пат. 3971317 США, МКИ<sup>2</sup> E21 B43/26. Detonation system and method / F.S.Gemmell, M.A.Fried. – Заявл. 12.2.74; Опубл. 27.07.76; Бюл. № 5. 3. *Круглицкий Н.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П.* Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наукова думка, 1983. – 154 с. 4. *Сизоненко О.Н.* Синергетический эффект в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных жидкостью сред при электроразрядном воздействии // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Вып. 42.* – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2003. – С. 173-186. 5. *Сизоненко О.Н., Шерстнев Н.М.* Особенности изменения фильтрационных характеристик пород-коллекторов при реагентно-импульсном воздействии // *Нефтяное хозяйство.* – 2001. – № 4. – С. 49-51. 6. *Сизоненко О.Н.* Электроразрядное воздействие на структуру капиллярно-пористых материалов // *Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Вып. 69.* – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2007. – С. 142-153. 7. *Сизоненко О.Н., Колмогорова Р.П., Тафтай Э.И.* и др. Влияние высоковольтного электрического разряда в растворах ПАВ на их моющие и ингибирующие свойства // *Нефтяное хозяйство.* – 2003. – № 2. – С. 53-55. 8. *Syzonenko O.M., Raychenko O.I.* Transformations in Hydrocarbon-Mineral Mixture Contacting with Tamol Solution at High-Voltage Electric Discharge // *High Temperature Materials and Processes.* – 2007. – Vol. 26, No. 2. – P. 131–137. 9. *Сизоненко О.Н., Райченко А.И.* Влияние высоковольтного электрического разряда на поведение композиции углеводородно-минеральная смесь/раствор ПАВ // *Наукові нотатки: Міжвузівський зб. наук. Праць.* – Луцьк: РВВ ЛДТУ. – 2007. – Вып. 20. – С. 447-452. 10. *Сизоненко О.Н., Тафтай Э.И., Малая Р.И., Колмогорова Р.П., Липан Е.В., Торпаков А.С.* Влияние высоковольтных импульсных разрядов в растворах поверхностно-активных веществ на их основные свойства // *Вестник Национального технического университета «ХПИ».* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – № 21. – С. 124-134. 11. *Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение* / Под ред. А.А.Абрамзона. – Л.: Химия, 1988. – 200 с. 12. *Абрамзон А.А.* Поверхностно-активные вещества: свойства и применение. – Л.: Химия, 1981. – 304 с. 13. *Ребиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия: Избранные труды. – М.: Наука, 1978. – 386 с.

*Поступила в редколлегию 08.09.2008*